

# 区域气象站蓄电池剩余容量预测算法分析

曾 杨 魏明明 胡 沁

(江西省大气探测技术中心 南昌 330096)

**摘要:**为了解决目前区域气象站维护业务中缺乏关于蓄电池剩余容量的有效监测手段等问题,开展了相关研究工作。首先通过电压测量法得到区域站蓄电池电压变化曲线,并采用二次多项式部分拟合作为其剩余容量的预测算法;然后利用 MATLAB 脚本代码计算得出基于试验样本的拟合最优参数;最后根据设定的计算模型和相关参数,开发了蓄电池剩余容量监测软件。经测试,预测误差值小于 10%,该软件能够及时向维护人员提供蓄电池的有效监测信息及预测信息。

**关键词:** 剩余容量;预测;多项式拟合

**中图分类号:** TN98    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.4020

## Analysis of prediction algorithm for residual capacity of battery in regional weather stations

Zeng Yang Wei Mingming Hu Qin

(Jiangxi Provincial Atmospheric Observation Technology Centre, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the shortage of effective monitoring ways of battery residual capacity in regional weather station maintenance service, relevant research work has been carried out. Firstly, through the voltage measurement to obtain the voltage change curve of regional station battery, and the prediction algorithm of its residual capacity was adopted by partial quadratic polynomial cooperation. Secondly, MATLAB script code was used to calculate the fitting optimal parameters based on experimental samples. Finally, according to the set calculation model and relevant parameters, the residual capacity monitoring software of the battery is developed. After testing, the prediction error value is less than 10%. This software can provide the maintenance staff with the effective monitoring information and prediction information of the battery in time.

**Keywords:** residual capacity; prediction; fitting of a polynomial

## 0 引 言

目前,全国区域气象站(以下简称“区域站”)的供电系统均采用铅酸蓄电池(以下简称“蓄电池”)。李效东、罗武等<sup>[1-2]</sup>针对蓄电池的充电及维护等问题开展了相关研究,但在当前业务中关于蓄电池运行状况和性能指标监测等方面,并没有建立相应的判定方法和告警机制,加之使用环境复杂多变与维护不当等原因,导致其使用寿命远远低于设计值。

在蓄电池的各项指标参数中,对于其剩余容量(或称为“剩余电量”)的预测非常重要。相关领域的专家就该问题进行了深入探讨,取得了一些重要成果<sup>[3-5]</sup>。本文在总结上述研究成果的基础上,通过简化估算过程,并结合实际需求,试图建立蓄电池相关监测指标与其剩余容量的回归辨

识模型。以电压测量法为基础设计试验方案,采用二次多项式拟合作为估测方法,并根据试验样本初步确定相关拟合参数,以求达到预测其剩余容量的目的。

## 1 常用的估算方法

预测蓄电池剩余容量的常用方法有电量累积法、内阻法、电压测量法等。以上方法各有优势,同时也存在影响其估算精度的约束条件。

电量累积法是通过累积蓄电池充电或放电量来推算其剩余容量,相对比较简单,但需要对蓄电池的循环次数进行补偿,且温度、放电率等因素将直接影响结果精度。内阻法是通过测量蓄电池内阻与剩余容量的相关性进行估算。由于测量过程比较复杂,且不同型号蓄电池的内阻与容量的关系曲线存在一定差异,因此该方法的通用性不强,其结

果的准确性同样难以保证<sup>[6]</sup>。

研究表明,当放电电流恒定时,蓄电池的当前电压  $U$  与剩余容量直接相关<sup>[7]</sup>,通过监测蓄电池电压进行预测的方式称之为电压测量法。综合考虑上述各种方法的优缺点,本文采用电压测量法作为实现方案,通过试验获取高精度蓄电池实时电压,从而进一步探究蓄电池剩余容量与当前电压之间的关系。

## 2 试验方案设计

该试验设计思路是在区域站原有系统中加入蓄电池电压及电流检测模块,检测系统整体设计如图 1 所示。其中,中央处理器采用 STM32 系列单片机,利用其集成的超快速 12 位 ADC 进行电压和电流采样,精度能够满足实际需求。采样电压及电流值通过串口通信传至上位机软件进行处理。

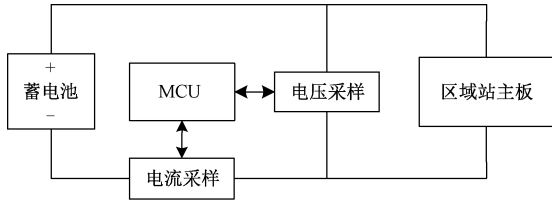


图 1 检测电路整体设计

检测电路的供电部分采用蓄电池单电源形式,没有接入太阳能板。因为区域站在实际运行中,由于太阳能板对于蓄电池电量的补充,而难以得到满意的预测结果。因此,本文中估测剩余容量的前提是蓄电池处于放电状态。参试蓄电池的参数规格为 6 V, 12 Ah, 以电池组并联的形式运行,两节蓄电池为一组,图 2、3 所示分别为其放电电流及电压变化曲线。试验环境温度为实时气温,由于蓄电池在单次放电过程中,环境温度波动较小,因而可以忽略温度对于蓄电池性能的影响。

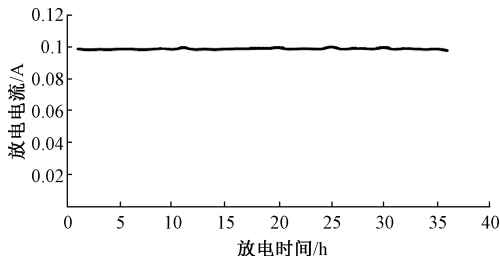


图 2 参试蓄电池放电电流曲线

结合蓄电池内阻在放电过程中的变化规律<sup>[8]</sup>,从图 3 中可以看出,其放电过程大致分为 3 个阶段。第 1 阶段为放电初期,蓄电池由开路状态瞬间进入负载状态,电压立即下降,该阶段持续时间较短。第 2 阶段为放电稳定期,持续时间较长,占总放电时间的比重较大,结合图 2 可知,在放电电流基本恒定的情况下,电压随时间变化关系呈线性趋

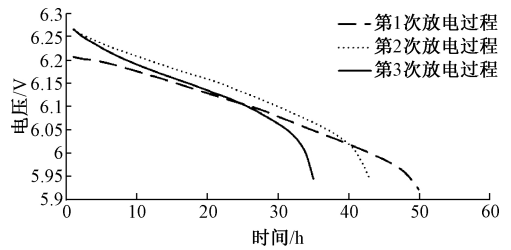


图 3 参试蓄电池连续 3 次放电过程中其电压变化曲线

势,与此同时,蓄电池内阻保持相对稳定的状态。第 3 阶段为放电末期,该阶段蓄电池内阻明显增加,电压迅速下降,当其运行至截止电压时,蓄电池停止工作,完成此次放电过程。

另外,蓄电池内阻伴随放电次数的增加而逐步增大,其电压出现持续下降的拐点,即蓄电池进入放电末期的时间不断提前。已经老化的蓄电池具有较高的内阻,相较新电池更早达到截止状态。

## 3 蓄电池剩余容量预测

### 3.1 预测模型简化

由区域站实际运行情况可知,蓄电池在日间主要处于充电状态,在夜间主要处于放电状态,其剩余容量可由式(1)表述。

$$Q_{rest} = Q - Q_{discharge} + Q_{charge} \quad (1)$$

式中: $Q$  为蓄电池总容量预测值; $Q_{discharge}$  为耗损电量; $Q_{charge}$  为补充电量。

由实际需求可知,预测剩余容量时需要屏蔽充电过程等不确定因素的影响。可将式(1)简化为:

$$Q_{rest} = Q - Q_{discharge} \quad (2)$$

由于区域站工作电流基本恒定,设蓄电池放电电流为  $I_{discharge}$ , 放电时间为  $t_{discharge}$ , 放电截止时间预测值为  $t_{end}$ , 则由式(2)进一步得到:

$$Q_{rest} = I_{discharge} \times (t_{end} - t_{discharge}) \quad (3)$$

式中: $I_{discharge}$  和  $t_{discharge}$  均为已知量,进而将计算模型简化为对其放电截止时间的预测。在实际运行中,由于每节蓄电池的性能不可能完全相同,因而进行如下假定:认为同一组中两节蓄电池的性能完全一致,将其视为一个整体进行分析。

### 3.2 算法选择

由于在实际中通常无法获取蓄电池循环次数等参数,因而无法选用 SVM、神经网络等机器学习算法进行估测。根据蓄电池电压曲线为非线性且连续变化的特性,本文采用多项式拟合方法进行回归分析。

图 3 表明,蓄电池电压曲线具有明显的分段特性,当处于放电稳定期时,其电压变化过程具有较高的线性度。而在其它阶段,尤其是放电末期,电压变化呈非线性。针对该类型曲线的回归,其拟合多项式的次数不宜偏高,若次数越

高,则计算模型越复杂,将会导致拟合函数的泛化能力下降,出现过拟合的几率增加。由试验数据计算得知,若采用 3 次或更高次数时,其拟合效果较好,但预测效果不理想。此外,待预测的截止电压处于放电末期,该阶段中蓄电池的放电特性与其他阶段截然不同,因此,当蓄电池处于前两个放电阶段时,估算结果误差较大。

基于上述分析,本文进一步采用二次多项式进行部分曲线拟合<sup>[9-15]</sup>,实现过程如图 4 所示。其中, $t_{fit}$ 为拟合区间的样本数量,即拟合区间的时间宽度; $u_{start}$ 为拟合起始电压,拟合区间随电压曲线的变化移动,而拟合区间的时间宽度保持不变。设定  $t_{fit}$  为 4 h,当前放电时间为 30 h,则拟合区间为 27~30 h。当放电时间变为 31 h,则拟合区间变为 28~31 h。

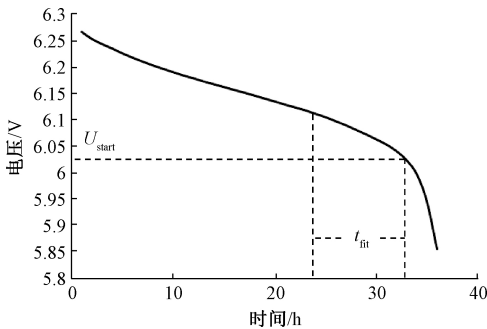


图 4 蓄电池电压曲线拟合过程

### 3.3 拟合参数选优

针对电压变化曲线进行多项式部分拟合时,其算法实现采用 MATLAB 提供的曲线拟合函数 polyfit 以及预测函数 polyval。首先采用 polyfit 函数对曲线中选定区间的  $n$  组样本  $(u_1, t_1), (u_2, t_2), \dots, (u_n, t_n)$  进行拟合,得到关于放电时间  $t$  与其对应电压  $u$  的回归模型及相关系数:

$$t = a \times u^2 + b \times u + c \quad (4)$$

将相关系数以及待预测自变量  $u_{end}$  代入 polyval 函数进行预测,最终得到截止时间预测值  $t_{end}$ 。其中, $u_{end}$  为本次循环过程的截止电压。基于上述算法,本文将图 3 中 3 组放电曲线,共计 128 个数据样本进行预测计算,另外两组放电过程数据作为其检验样本。预测结果误差为:

$$\delta_i = \frac{t_i - t_{ture}}{t_{ture}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:在设定的拟合区间时间宽度下, $t_i$  表示在放电时间为  $i$  时的截止时间预测值, $t_{ture}$  为其真实值。

由式(5)可以得到关于拟合区间时间宽度与预测结果误差的关系,选取对于第 3 组电压曲线进行预测的部分误差结果见表 1。由于蓄电池在夜间基本处于放电状态,因此拟合区间的样本数应在 12 以内。如果样本数太少,则会影响预测精度,故将其样本数设定在 4~9 范围内,即拟合区间时间宽度为 4~9 h。

表 1 不同拟合区间时间宽度下预测误差值

(%)

放电时间/ h	蓄电池电压/ V	拟合区间时间宽度/h					
		4	5	6	7	8	9
22	6.123	92.33	70.54	52.31	30.55	28.96	29.24
23	6.118	132.00	88.45	76.73	63.04	45.57	40.73
24	6.111	-106.44	7.28	22.70	35.21	37.39	31.68
25	6.105	-23.74	-45.84	-0.14	11.59	22.64	26.96
26	6.097	-24.72	-39.24	-46.03	-19.90	-8.00	3.41
27	6.090	-28.89	-16.24	-26.47	-33.45	-20.57	-12.78
28	6.081	-4.90	-20.36	-16.34	-21.99	-26.95	-20.41
29	6.072	5.08	4.70	-6.29	-7.56	-12.76	-17.49
30	6.063	13.89	7.30	6.43	-0.16	-2.24	-6.38
31	6.053	4.54	9.58	7.32	6.83	2.89	1.07
32	6.040	-7.02	-3.95	0.62	1.39	2.26	0.80
33	6.023	-10.00	-8.54	-7.09	-4.62	-3.50	-2.42
34	5.997	-3.72	-4.73	-5.02	-5.00	-4.45	-4.09
35	5.945	-0.01	-0.05	-0.10	-0.16	-0.22	-0.25

由表 1 可以看出,预测误差在蓄电池放电末期逐渐减小,从而验证了采用部分曲线拟合方法的合理性。根据截止电压预测值的平均误差公式:

$$\bar{\delta} = \frac{|\delta_1| + |\delta_2| + \dots + |\delta_n|}{n} \quad (6)$$

将其平均误差设定为 10% 以内,则可得各拟合区间时

间宽度下,在其误差范围内的  $u_{start}$  极大值,例如:设拟合区间时间宽度为 4 h,根据式(6)计算可得,当放电时间为 27 h,蓄电池电压为 6.090 V 时,其平均误差为:

$$\bar{\delta} = [|-28.89\%| + |-4.90\%| + |5.08\%| + |13.89\%| + |4.54\%| + |-7.02\%| + |-10.00\%| + |-3.72\%| + |-0.01\%|]/9 = 8.67\%$$

而当放电时间为 26 h 时  $\bar{\delta} = 10.28\%$ ，超出了设定的误差范围。在保证预测精度的基础上， $u_{start}$  越高，拟合的有效范围越大，效果越好。则该拟合区间时间宽度下，其  $u_{start}$  极大值为 6.090 V。根据上述算法，可以同时得到另外两组循环过程的电压极大值，如表 2 所示。

表 2 允许误差范围内，各拟合区间时间宽度下的电压极大值 (V)

循环次数 序号	拟合区间时间宽度/h					
	4	5	6	7	8	9
1	6.057	6.061	6.109	6.113	6.113	6.113
2	6.073	6.073	6.073	6.073	6.073	6.073
3	6.090	6.090	6.090	6.090	6.105	6.105

根据向上兼容的原则(例如:假定拟合区间时间宽度为 4 h,在其 3 组  $u_{start}$  极大值中,只有 6.057 能够同时满足在 3 次循环过程中,预测结果的平均误差均在允许范围内),在各拟合区间时间宽度下,选取其对应的  $u_{start}$  极大值作为备选项,如表 3 所示。

表 3 拟合起始电压最优值备选项 (V)

变量	拟合区间时间宽度/h					
	4	5	6	7	8	9
$u_{start}$	6.057	6.061	6.073	6.073	6.073	6.073

由表 3 可知,  $u_{start}$  设置为 6.073 时,其拟合的有效范围最大,比较拟合区间时间宽度分别为 6~9 h 的预测结果后发现,在拟合区间时间宽度为 6 h 时,其结果的平均误差为 7.6%,相对最小。因此,本文最终将拟合区间时间宽度及拟合初始电压设置为 6 h,6.073 V。对于预测函数中的蓄电池截止电压值,则根据放电曲线的经验值取平均,设置为 5.937 V。

### 3.4 结果分析

根据蓄电池放电曲线特性和设定的预测精度,本文计算得出了基于试验数据的最优拟合参数,在保证结果精度的基础上,使预测的有效时间范围最大化;采用二次多项式拟合方法则避免了过拟合所引起的预测误差。

利用上述参数和算法对另外两组试验数据进行检验,其结果平均误差分别为 8.21% 和 1.56%,均在设定值 10% 以内,达到了预期效果。

## 4 软件实现

预测软件界面设计及调试基于 Microsoft Visual Studio 2012 开发环境,采用 C# 语言编写。软件采用 SerialPort 控件实现数据通信,当蓄电池的监测数据满足系统设置的拟合条件时,则开始预测。

该界面的主要监测信息包括蓄电池实时电压、曲线拟合的相关系数、剩余放电时间预测值以及剩余容量预测

值,其中,剩余容量为剩余放电时间与电流值的乘积。软件实现流程如图 5 所示。

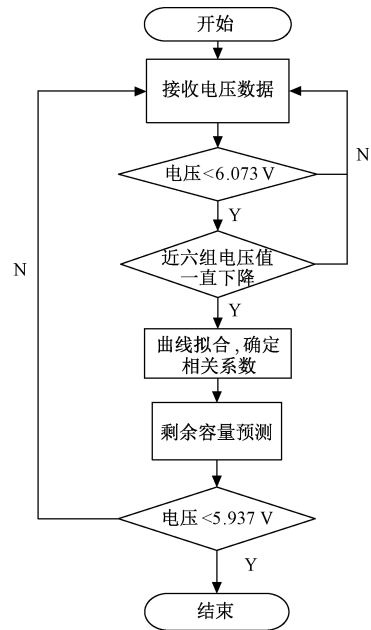


图 5 软件流程

## 5 结 论

根据区域站工作电流恒定的实际情况,本文采用电压测量法进行蓄电池剩余容量预测的试验方案设计。在蓄电池处于放电情况下,通过高精度电压、电流检测电路进行采样,获取其电压变化曲线。

本文充分考虑温度变化、循环次数以及充电过程所带来的不确定因素,在选择估算模型时尽量屏蔽上述情况的影响,将蓄电池单次放电过程抽离出来进行建模,并根据其放电电压随时间变化规律,采用二次多项式部分拟合的方法进行预测。通过 MATLAB 算法脚本对于试验样本进行分析,得到适用于试验数据的最佳拟合参数,包括拟合起始电压、截止电压以及拟合区间时间宽度。

本文采用的估测模型和算法可应用于区域站蓄电池在放电末期的剩余容量预测,为蓄电池的维护工作提供了有效的监测信息。若需实现在其完整放电过程中的预测,还有待后续开展更多试验来进一步研究。

### 参考文献

- [1] 李效东,夏辉.自动气象站铅酸蓄电池充电技术探讨[J].气象科技,2004,32(4):303-304.
- [2] 罗武,陆鸿生,经志梅.区域自动气象站铅酸蓄电池常见故障维修[J].气象科技,2013,41(5):974-976.
- [3] 曾洁,卜凡涛.基于多项式回归算法的锂电池 SOC 估测[J].大连交通大学学报,2011,32(4):70-74.
- [4] 高明裕,张红岩.蓄电池剩余电量在线测量[J].电测与仪表,2000,37(9):28-31.

- [5] 魏东涛,黄之杰,孔华等.蓄电池 SOC 的研究及预测方法[J].电源技术,2016,40(6):1321-1323.
- [6] 王斯成,陈子平,杨 军等.蓄电池剩余容量(SOC)数学模型探讨和在线测试仪的开发[J].太阳能学报,2005,26(1):6-13.
- [7] 季国栋,王文理.蓄电池剩余容量检测系统设计[J].微型机与应用,2015,34(3):38-40,46.
- [8] 高娜,李鸣,韦国军.某武器装备铅酸蓄电池的性能检测[J].微计算机信息,2004,20(12):108-109,66.
- [9] 周松望,周杨锐,吴海京,等.分段多项式拟合在动三轴试验数据处理中的应用[J].海洋学报(中文版),2014,36(5):186-189.
- [10] 刘海燕,简弃非.纳米气体传感器灵敏度-温度曲线的拟合[J].华南理工大学学报(自然科学版),2004(6):27-30,35.
- [11] 刘丁,李晓斌,左磊.基于最小二乘支持向量机的 N 型热电偶非线性校正及应用[J].仪器仪表学报,2007,28(4):640-644.
- [12] 宋成军,何玉珠.基于最小二乘法的控制舱相位差测量技术[J].电子测量技术,2014,37(4):138-141.
- [13] 宋媛媛,王萍,张庆芳,等.基于最小二乘法的 TD-LTE 传播模型校正研究[J].电子测量技术,2015,38(1):123-125,130.
- [14] 吕洪赫,姚振杰,易卫东.基于对称性的最小二乘拟合随机椭圆检测算法[J].电子测量技术,2011,34(5):37-41.
- [15] 刘少梅,杨鼎才.基于最小二乘法和主元分析的车牌倾斜校正方法[J].电子测量技术,2008,31(4):49-51.

### 作者简介

曾杨,高级工程师,主要从事气象装备保障和运行监控工作。

E-mail: zengyang188@126.com